



作物模式應用於水稻灌溉策略之研擬

劉力瑜^{1*} 李昇峰¹

摘要

臺灣受氣候變遷的影響，雖然年總雨量變化不明顯，但極端降雨量發生的頻率提高，作物更易遭受乾旱或淹水的逆境，因應氣候變遷衝擊和挑戰，臺灣農業生產作物品質，需發展更有彈性的調適策略。本研究以 DSSAT CERES-RICE 作物模式，以網格化的土壤與氣象重建資訊，配合臺灣由南至北不同的插秧日期，模擬‘台梗 9 號’、‘台南 11 號’、‘台南 16 號’、‘桃園 3 號’、‘台農 71 號’等五種臺灣主要栽培稻品種在無灌溉情境下的產量，藉以評估水稻於乾旱逆境下的減產風險。未來還能根據不同情境規劃更精緻的灌溉供水排程模擬，作為農業耕作調適參考之基礎。

關鍵詞：水稻、灌溉、作物模式、調適策略

¹ 國立臺灣大學農藝學系。

*通訊作者(lyliu@ntu.edu.tw)



前言

氣候變遷的衝擊下，全球農業生產受到程度不一的衝擊，進而影響農產品之國際交易市場。因氣候變遷對作物生產造成的威脅中，以乾旱對全球產量的衝擊最大，因此乾旱對作物生理或生產造成之影響的研究也最深入 (Snowdon et al., 2021)。缺水影響作物的生長發育與產量，例如減數分裂時小麥和水稻的缺水會導致籽粒減少 35-75% (Saini and Aspinall, 1981; Sheoran and Saini, 1996) 或收穫指數降低 40% (Garrity and O' Toole, 1994)，大豆籽粒充實階段乾旱影響下產量可能減少高達 42% (Maleki et al., 2013)。乾旱逆境除了受降雨量頻率與降雨分佈的影響，也可能是其他環境因素的晝夜波動 (如高光強度等) 導致根系吸水率和冠層蒸發速率之間的不平衡所造成。氣候變遷下年降雨量不一定發生顯著變化，但降雨的頻率和分佈產生變化下，可能導致供水時間與植物需求不一致 (Bönecke et al., 2020)。此外，春季溫度的小幅上升可能導致作物提早或加速生長，在發育階段初期消耗更多的水量導致夏天供水不足 (Lian et al., 2020)。乾旱和高溫逆境的綜合影響，比起各自對作物生產造成的影響更具破壞性：溫度升高導致光合作用的關鍵酵素 Rubisco 遭受破壞，迫使作物停止光合作用，導致產量更大幅度的降低 (Raza et al., 2019)。

評估農業生產受氣候變遷的影響，包含 (a) 氣候變遷對各種生產系統的直接影響，以及 (b) 受到影響之生產系統的經濟評估，以提供農民或其他利害關係人最適切的調適選項，前者常使用作物或禽畜模擬模式來達成，並且已經有相當大量的案例研究文獻 (Thamo et al., 2017)。過去作物模式發展的方向，是將環境對作物生長的生理機制模式化，以對不同氣候或土壤情境提供使產量最優化的生產管理建議，因此過去作物模型以應用於單一田區、單一作物為主，研究者可藉以調整主要栽培管理的條件，也已經發展出模擬數個季節不同作物輪作或休耕的模擬模式，可在田區小規模評估特定作物受氣候變遷的影響 (Bindi et al., 1996; Semenov et al., 1996)。隨著對評估大區域 (國內地區、全國、數國範圍、甚至全球等) 氣候變遷對作物生長影響的逐漸重視，近期的作物模式必須能應用在較大區域的模擬，目前也有文獻探討不同模型模擬的不確定性 (Rötter et al., 2012)，放大尺度的可行性 (Ewert et al., 2011)，及應用在評估極端氣候的影響與調適 (Rötter et al., 2018)。



本研究藉助於國際常用的作物模式決策支持系統 Decision Support System for Agrotechnology Transfer (簡稱 DSSAT) 的水稻作物系統模型 CERES-RICE (Jones et al., 2003), 模擬 '台稈 9 號' (Taiken9)、'台南 11 號' (Tainan11)、'台南 16 號' (Tainan16)、'桃園 3 號' (Taoyuan3)、'台農 71 號' (Tainung71) 等五種臺灣主要栽培稻品種在無灌溉情境下的產量, 藉以評估臺灣本島各個地區種植水稻的減產風險, 本研究目的除了呈現作物模式模擬結果可做為評估各地點生產力之客觀依據, 亦可應用於輔助大區域生產調適策略的擬定, 做為農業耕作調適參考基礎。

材料與方法

一、DSSAT CERES-RICE 作物模式參數設定

DSSAT CERES-RICE 作物模式模擬的輸入資料包含環境數據 (氣象與土壤)、栽培管理資訊 (包含種植品種、插秧日期、種植密度、施肥與灌溉日期用量等), 不同種植品種亦需各自提供其對應之作物參數。必須輸入的氣象數據包含每日最高溫 ($^{\circ}\text{C}$)、最低溫 ($^{\circ}\text{C}$)、雨量 (mm)、日輻射量 (MJ/m^2), 本研究採用「臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平臺」(TCCIP) 所產製的 2019 年「臺灣歷史氣候重建資料」(TReAD, https://tccip.ncdr.nat.gov.tw/ds_03_mall.aspx), 空間尺度為 2 km (黃, 2022)。欲模擬乾旱情境必須輸入環境土壤資訊, 最少需輸入的資訊為土壤分類, 為了能忠實反映臺灣實際土壤多樣性, 本研究沿用施 (2021) 將臺灣詳測土壤圖資所建立的 DSSAT 臺灣農地土壤檔, 選擇氣象網格點最鄰近之土壤資料, 將土壤與氣象資料合併後共獲得 469 個臺灣農地網格點。

栽培管理數據參考黃 (2022): 行距為 30 cm、種植密度為 22 叢 / m^2 , 依據模擬網格所在緯度指定插秧日期, 以符合臺灣第一期作由南至北陸續插秧的現況: 從最南端 (21.95°N) 至最北端 (25.3°N) 等比例分為 7 個區域, 插秧日期依序為 1/1、1/11、1/21、2/1、2/11、2/21、3/1; 其次, 氮肥施用管理設定為: 於插秧首日施予每公頃 36 公斤的基肥、插秧後 30 日施予每公頃 54 公斤的追肥、插秧後 45 日施予每公頃 30 公斤的穗肥; 灌溉則分為無灌溉 (看天田) 及自動灌溉兩種模式, 自動灌溉參考黃亭禎 (2022) 之參數設置: IMDEP (灌溉管理深度) = 30 cm、ITHRL (觸發自動灌溉的可用水量下限) =



50%、ITHRU (灌溉完成之可用水量上限) = 100%。最後，‘台稉 9 號’、‘台南 11 號’、‘台南 16 號’、‘桃園 3 號’、‘台農 71 號’等五種臺灣主要栽培稻品種作物參數參考吳 (2022) 設定。

二、風險評估

透過 DSSAT CERES-RICE 模擬，分別得到每一個網格無灌溉 (看天田) 及自動灌溉的產量後，以 R 軟體繪製產量地圖呈現各網格之產量差異，並計算第 i 個網格無灌溉的風險程度 (Ri)，定義如式 (1)：

$$R_i = \max(0, [AUTO_i - RAIN_i]/A_i \times 100\%) \quad (1)$$

AUTO_i：第 i 個網格自動灌溉之產量模擬結果；

RAIN_i：第 i 個網格無灌溉 (看天田) 之產量模擬結果。

結果與討論

‘台稉 9 號’、‘台南 11 號’、‘台南 16 號’、‘桃園 3 號’、‘台農 71 號’等五種臺灣主要栽培稻品種在自動灌溉情境下的產量模擬摘要統計值如表一，各地模擬產量介於 2,000 至 9,000kg/ha。比較無灌溉 (看天田) 及自動灌溉的模擬產量，並計算各個網格無灌溉風險程度，所得五個品種風險分佈圖如圖 1。全臺 469 個網格點中，約有 38% 之風險值為零，顯示這些地點在 2019 年第一期作生育期的雨量充沛，並未造成水稻減產。其他地點則造成比例不同的減產效應，不同品種的減產效應相當，大約有 50% 的地點造成減產超過 20%。依據減產比例製作的風險地圖如圖 2，可觀察到無論品種，高減產風險 (75-100%) 集中在緯度較低的高雄縣與屏東縣，中度風險 (25-75%) 的地區則落在雲林縣、嘉義縣、臺南縣及部分臺東縣。

紀錄 DSSAT CERES-RICE 水稻自動灌溉用水量，可比較水稻不同生育期之需水量 (圖 3)，發現孕穗期 (Panicle initiation) 需水量最大，平均佔全生育期用水之 50%，而分



藥期 (Juvenile-to-PanInit) 及穀粒充實期 (Grain filling) 需水量次之。但各品種需水量模擬結果近似。根據黃 (2022) 年分時期探討減產風險之結果，顯示水稻在孕穗期缺水減產的風險最大，以高屏地區約一月中下旬插秧、模擬結果顯示孕穗期大約發生於二月下旬至三月中旬間，期間若提供足夠的灌溉水，即使其他時期未灌溉，減產風險可降至 50% 以下，並且灌溉用水可節省 38-73%。

結論

本研究以 2019 年的氣候資料進行模擬，若有評估未來氣候變遷情境下的生產狀況，能將不同未來情境下的氣候預測資料、土壤資料、具調適潛力之作物品種對應參數納入 DSSAT 模型，大規模批次性建立風險地圖，可助於建立動態調整調適策略，作為氣候智慧生產的參考，以最大限度地減少農民的損失。

誌謝

本研究感謝科技部計畫「臺灣氣候智慧調適與跨領域氣候風險評估之研究 - 糧食生產於未來氣候風險下之智慧調適策略評估」(MOST 108-2621-M-002-021-MY3) 之經費支持。

參考文獻

- 吳均上。2022。設定 DSSAT 水稻品種參數並建立溫度與缺水之產量預警模型。碩士論文。臺北：國立臺灣大學農藝學系。
- 施愷哲。2021。DSSAT 模式結合網格化土壤資訊預測水稻產量之可行性評估。碩士論文。臺北：國立臺灣大學農藝學系。
- 黃亭禎。2022。DSSAT 模擬灌溉對臺灣水稻產量影響及風險地圖繪製。碩士論文。臺北：國立臺灣大學農藝學系。
- Bindi, M., Fibbi, L., Gozzini, B., Orlandini, S., Miglietta, F., 1996. Modelling the impact of



- future climate scenarios on yield and yield variability of grapevine. *Clim. Res.* 07:213-224. <https://doi.org/10.3354/cr007213>
- Bönecke, E., Breitsameter, L., Brüggemann, N., Chen, T. W., Feike, T., Kage, H., Kersebaum, K. C., Piepho, H. P., Stützel, H., 2020. Decoupling of impact factors reveals the response of German winter wheat yields to climatic changes. *Glob. Change Biol.* 26:3601-3626. <https://doi.org/10.1111/gcb.15073>
- Ewert, F., van Ittersum, M. K., Heckelei, T., Therond, O., Bezlepkina, I., Andersen, E., 2011. Scale changes and model linking methods for integrated assessment of agri-environmental systems. *Agric. Ecosyst. Environ., Scaling methods in integrated assessment of agricultural systems* 142:6-17. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.05.016>
- Garrity, D. P., O' Toole, J. C., 1994. Screening rice for drought resistance at the reproductive phase. *Field Crops Res.* 39:99-110. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(94\)90012-4](https://doi.org/10.1016/0378-4290(94)90012-4)
- Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor, W. D., Hunt, L. A., Wilkens, P. W., Singh, U., Gijssman, A. J., Ritchie, J. T., 2003. The DSSAT cropping system model. *Eur. J. Agron.* 18:235-265. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00107-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00107-7)
- Lian, X., Piao, S., Li, L. Z. X., Li, Y., Huntingford, C., Ciais, P., Cescatti, A., Janssens, I. A., Peñuelas, J., Buermann, W., Chen, A., Li, X., Myneni, R. B., Wang, X., Wang, Y., Yang, Y., Zeng, Z., Zhang, Y., McVicar, T. R., 2020. Summer soil drying exacerbated by earlier spring greening of northern vegetation. *Sci. Adv.* <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax0255>
- Maleki, A., Naderi, A., Naseri, R., Fathi, A., Bahamin, S., Maleki, R., 2013. Physiological performance of soybean cultivars under drought stress. *Bull Env Pharmacol Life Sci* 2:38-44.
- Raza, A., Razzaq, A., Mehmood, S. S., Zou, X., Zhang, X., Lv, Y., Xu, J., 2019. Impact of Climate Change on Crops Adaptation and Strategies to Tackle Its Outcome: A Review. *Plants* 8:34. <https://doi.org/10.3390/plants8020034>



- Saini, H. S., Aspinall, D., 1981. Effect of Water Deficit on Sporogenesis in Wheat (*Triticum aestivum* L.). *Ann. Bot.* 48:623-633. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a086170>
- Semenov, M. A., Wolf, J., Evans, L. G., Eckersten, H., Iglesias, A., 1996. Comparison of wheat simulation models under climate change. II. Application of climate change scenarios. *Clim. Res.* 07:271-281. <https://doi.org/10.3354/cr007271>
- Sheoran, I. S., Saini, H. S., 1996. Drought-induced male sterility in rice: Changes in carbohydrate levels and enzyme activities associated with the inhibition of starch accumulation in pollen. *Sex. Plant Reprod.* 9:161-169. <https://doi.org/10.1007/BF02221396>
- Snowdon, R. J., Wittkop, B., Chen, T. W., Stahl, A., 2021. Crop adaptation to climate change as a consequence of long-term breeding. *Theor. Appl. Genet.* 134:1613-1623. <https://doi.org/10.1007/s00122-020-03729-3>
- Thamo, T., Addai, D., Pannell, D. J., Robertson, M. J., Thomas, D. T., Young, J. M., 2017. Climate change impacts and farm-level adaptation: Economic analysis of a mixed cropping–livestock system. *Agric. Syst.* 150:99-108. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2016.10.013>

表 1 五種臺灣主要栽培稻品種自動灌溉模擬產量 (kg/ha) 摘要統計值

Table 1 Summary statistics of simulated yield (kg/ha) under automatic irrigation for the five rice cultivars.

Summary Statistics	Cultivar				
	Taiken9	Tainan11	Tainan16	Taoyuan3	Tainung71
Minimum	2,871	2,178	2,054	2,025	2,391
Medium	7,299	5,899	4,973	6,318	7,490
Mean	7,114	5,754	4,851	6,140	7,297
Maximum	8,708	7,027	5,952	7,610	8,925

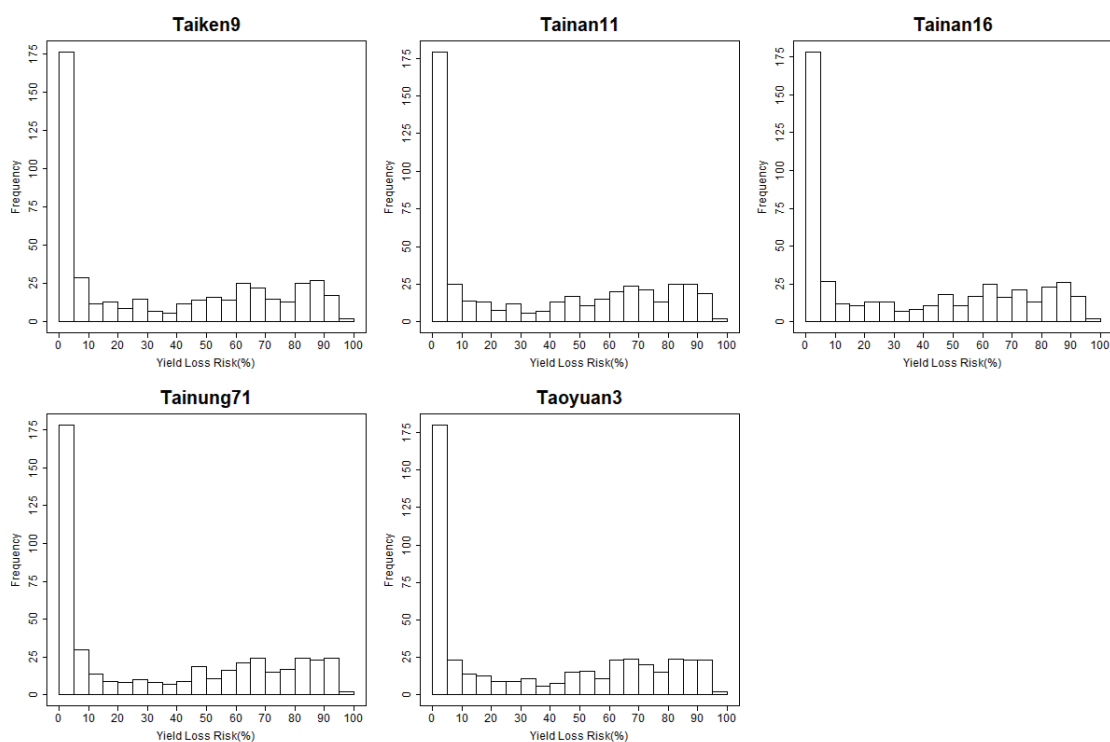


圖 1 DSSAT CERES-RICE 模擬五種臺灣主要栽培稻品種 2019 年第一期作無灌溉風險分佈圖

Fig. 1 The distributions of the simulated non-irrigation risks for the 5 rice cultivars in the 1st cropping season on 2019 by DSSAT CERES-RICE.

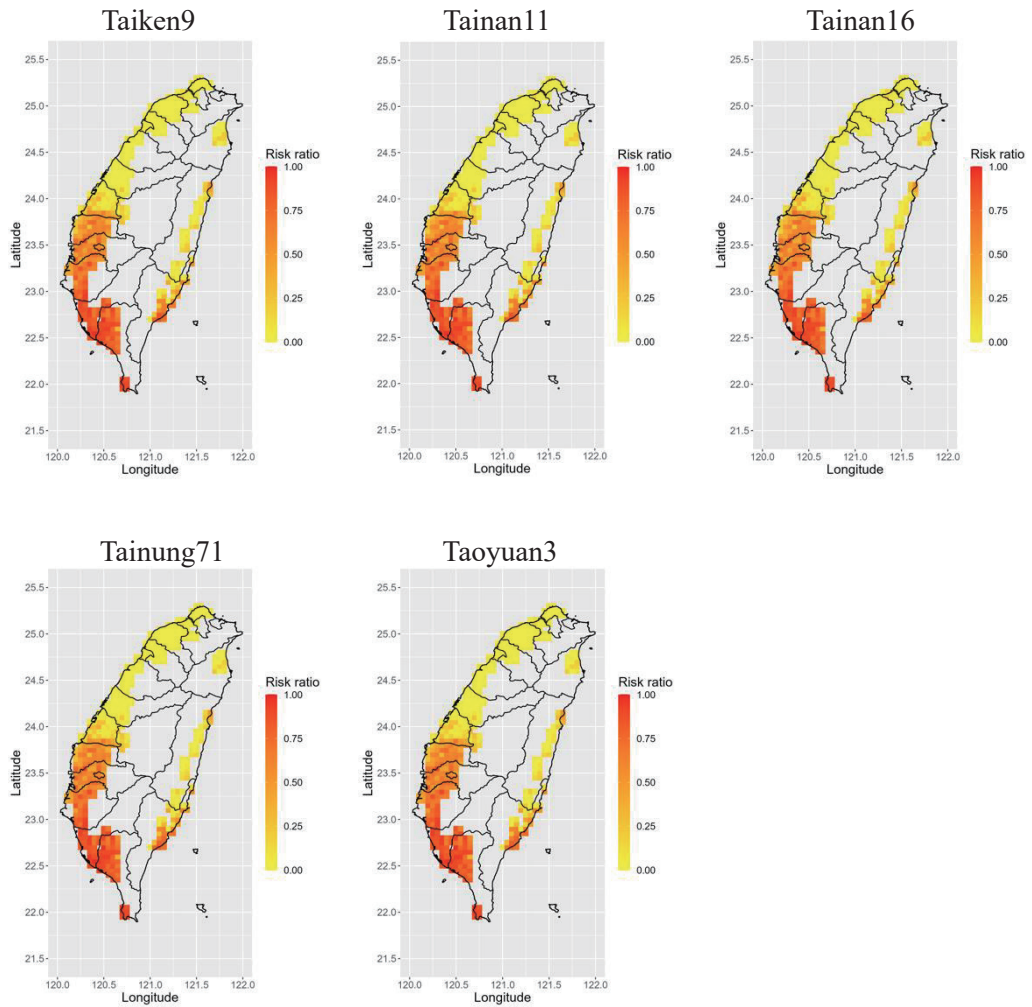


圖 2 DSSAT CERES-RICE 模擬五種臺灣主要栽培稻品種 2019 年第一期作無灌溉風險地圖

Fig. 2 The simulated non-irrigation risk maps for the 5 rice cultivars in the 1st cropping season on 2019 by DSSAT CERES-RICE.

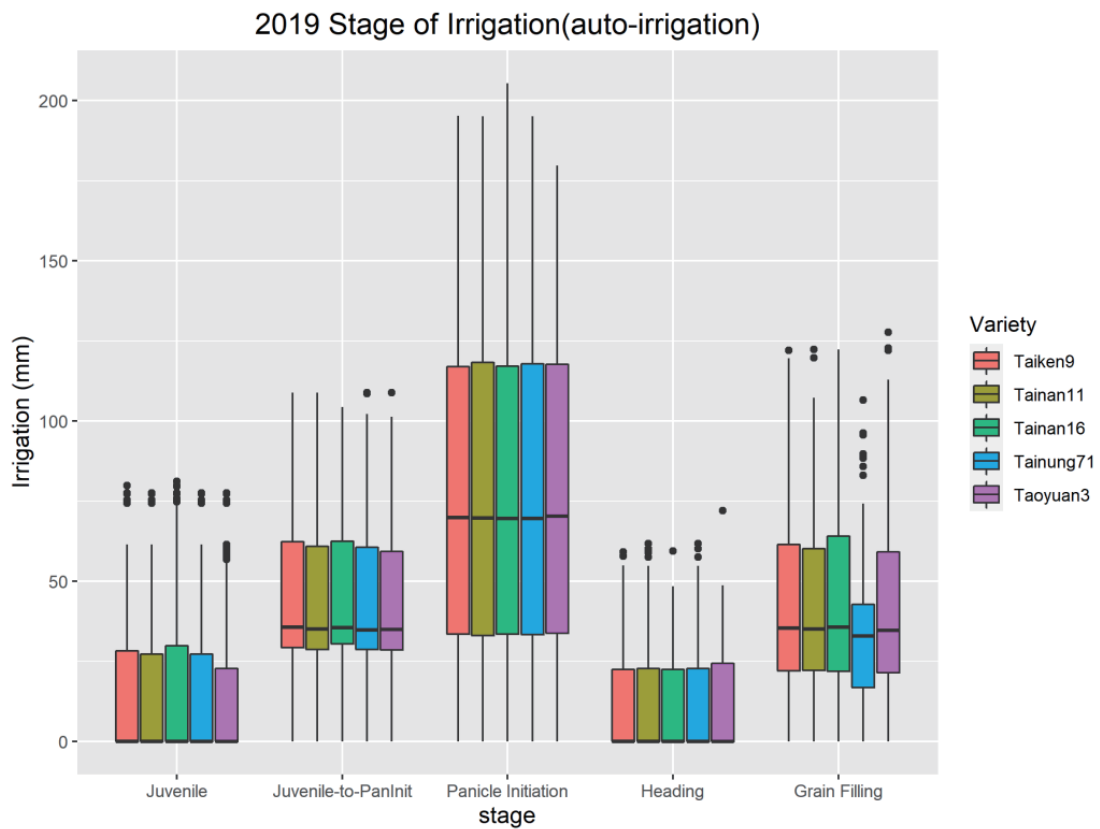


圖 3 DSSAT CERES-RICE 模擬五種臺灣主要栽培稻品種 2019 年第一期作各生育期灌溉用水量

Fig. 3 The amount of irrigation water for the 5 rice cultivars in the 1st cropping season on 2019 simulated by DSSAT CERES-RICE.



Application of crop modeling in developing rice irrigation strategies

Li-yu Daisy Liu^{1*} Sheng-Feng Li¹

Abstract

Impacted by the forces of climate change, Taiwan's annual rainfall has remained relatively constant; however, there has been a discernible rise in the occurrence of intense rainfall events. This heightened frequency of extreme precipitation renders crops increasingly susceptible to the dual challenges of droughts and flooding. In light of these evolving climatic influences, the agricultural sector in Taiwan must actively cultivate more resilient and adaptable strategies to bolster both production and crop quality. This study employs the DSSAT CERES-RICE crop model, coupled with gridded soil and meteorological data reconstruction. Accounting for varying transplanting dates from south to north Taiwan, the study simulates the yields of five rice cultivars, including Taiken 9, Tainan 11, Tainan 16, Taoyuan 3, and Tainung 71, under non-irrigated conditions. The aim is to assess the risk of reduced rice yields under drought stress. Furthermore, future endeavors could involve the refinement of irrigation and water supply scheduling simulations under different scenarios, serving as a foundational reference for agricultural cultivation adaptations.

Keyword: Rice, Irrigation, Crop model, Adaptation strategy

¹ Department of Agronomy, National Taiwan University, Taiwan.

*Corresponding author (lyliu@ntu.edu.tw)